

## 高圧噴射攪拌工法を用いた原位置バイオレメディエーション

塩尻大輔<sup>\*1</sup> 北詰昌義<sup>\*1</sup>  
佐久間孝夫<sup>\*2</sup> 熊沢章<sup>\*2</sup>

### 概 要

土壌汚染対策工事における掘削除去は確実性がある一方、汚染土の移動に伴う環境負荷、環境リスクが大きいこと、また高価であること等の問題を抱えており、原位置浄化への期待が高い。しかし、砂質土と比較して、難透水性のシルト、粘土に揮発性有機塩素化合物(CVOCs)が付着、浸透しているような場合は、原位置浄化により安定した浄化品質を確保することは一般的に困難である。この様な場合、施工機械が小型でかつ土質に大きく左右されることなく汚染部位に的確に薬剤を到達させることのできる噴射攪拌は有効であると考えられるが、汚染物質を含む排泥を伴いその処理に手間と費用がかかるという短所があった。本稿は、排泥の減少と効率的な薬剤接触を目的とした原位置浄化用の高圧噴射攪拌工法を開発し、実際の汚染サイトで原位置バイオレメディエーションとしての実証を試みた結果を報告するものである。

### Case study: In-situ anaerobic bioremediation using coupled method of high-pressure jet injection and soil mixing

#### Abstract

Excavation of contaminated soil is one way to decontaminate a site, but it is expensive, brings its own risks and simply transfers the environmental damage elsewhere. As a result so in-situ treatment technology is preferred where possible. But when impermeable clay and silty soil is contaminated by Chlorinated volatile organic compound (CVOCs), it's difficult to treat by in-situ technology. In this case using coupled method of high-pressure jet injection and soil mixing is effective, but treatment of the resulting contaminated sludge costs time and money. Here we show case study where in-situ anaerobic bioremediation combined with high-pressure jet injection and soil mixing produces less sludge and removes contamination more effectively

キーワード: 土壌汚染、原位置浄化、高圧噴射攪拌、バイオレメディエーション

\*1 建設本部 環境エンジニアリングセンター 土壌環境部

\*2 東興ジオテック株式会社

## §1. はじめに

土壤汚染対策工事における掘削除去は確実性がある一方、汚染土の移動に伴う環境負荷、環境リスクが大きいこと、また今後はオリンピック施設新設工事や大規模土木工事の増加等に伴い処理施設が逼迫し、ますます処理費が高騰すると予想されること等の問題を抱えており、原位置浄化への期待が高い。

原位置浄化技術の中でも多用される原位置分解技術は、使用する薬剤の性能<sup>1)</sup>とあわせて、薬剤を汚染部位に到達させる工法があつてはじめて成り立つ。均質な透水性のよい砂質土が汚染部位であれば井戸からの自然注入や加圧注入で対応できるが<sup>2)</sup>、難透水性のシルト、粘土が汚染部位の場合は対応が極めて難しく問題となっている。

攪拌翼で汚染部位と薬剤を混合攪拌して分解する機械攪拌工法も考えられるが、重機が大きな空間を必要とするため、建屋内や狭隘地での施工に制限がある場所では困難である。このような場合の選択肢としては小型機械を用いる薬液注入か噴射攪拌が考えられる。二重管ストレーナ工法やダブルパッカ工法等の薬液注入の場合、シルト、粘土での薬剤接触は割裂及びその後の浸透・拡散に期待することになり長時間を要すると考えられる。一方、噴射攪拌は土質に大きく左右されることなく汚染部位に的確に薬剤を到達させる方法として有効であると考えられる。しかし、噴射攪拌は積極的に排泥を地上に上げて噴射材料で置き換える工法であるため、汚染物質を含む排泥を伴いその処理に手間と費用がかかるという短所があつた。

上記のような背景から、筆者らは、排泥の減少と効率的な薬剤接触を目的とした原位置浄化用の高圧噴射攪拌工法を開発し、実際の汚染サイトで原位置バイオレメディエーションとしての実証を試みた。

## §2. 開発した高圧噴射攪拌工法

開発のポイントは次の2点である。

### 1) 有効径の確保・拡大

水溶液タイプのバイオ促進剤を高圧で噴射攪拌するための噴射ロッドを新規に設計し、吐出圧や噴射量の管理等の管理手法を開発する。

### 2) 排泥の発生抑制

注入ロッド周りからの排泥を抑えるパッカー機能を備えた口元管を開発する。

以上の開発のポイントに従って、汚染サイトに適用する前にまず非汚染サイトにおいて、有効径や排泥量等の性能比

較、評価を行い、諸元を設定した。システムおよび口元管の概要を図1に示す。

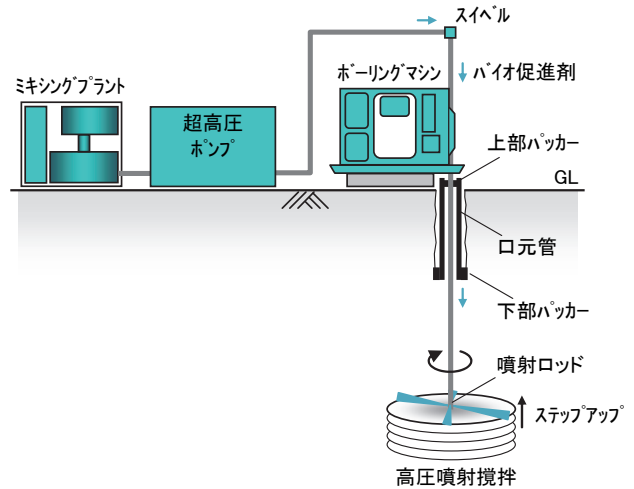


図1 高圧噴射工法の概要

## §3. 原位置バイオレメディエーションへの適用

### 3.1 実証サイトの概要

現地は操業中の機械工場内であり、土質は図2に示すように砂質土と粘性土が互層になっている複雑な地盤である。GL-11m付近で岩盤になる。地下水位は約GL-2~3mである。汚染物質はトリクロロエチレン(TCE)とシス-1,2-ジクロロエチレン(cDCE)である。汚染物質濃度等の諸元を表1に示す。

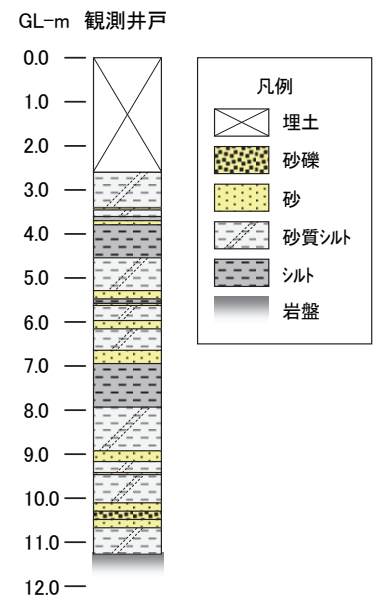


図2 実証サイトの土質

表1 汚染物質濃度等の諸元

地下水位		GL-2~3m	
汚染物質最大濃度	土壌溶出量	TCE	0.13 mg/L
	GL-9.0m	cDCE	0.76 mg/L
地下水	施工前	TCE	0.063 mg/L
		cDCE	0.75 mg/L
	施工直後	TCE	0.15 mg/L
		cDCE	19 mg/L

### 3.2 方法

#### 1) 施工方法

噴射攪拌は観測井戸から1m離れた3ヶ所で実施した。噴射攪拌の深度範囲は土壌汚染が認められる GL-3.5～5.0m および GL-7.0～11.5m とした。バイオ促進剤は、トリータビリティ試験で性能評価済みの植物油乳化物を主体とする水溶液を使用した。噴射する水溶液量は土壌間隙の最大30%程度を目安に設定した。

#### 2) 評価方法

バイオ促進剤の地盤中での到達確認は、施工前と施工直後の電気伝導度（EC）を比較することで評価した。施工前の地盤のECは土質により差はあるが、砂質土で20 mS/m、粘性土で50 mS/m程度であったのに対し、使用したバイオ促進剤のECは300 mS/m程度の値であることから、バイオ促進剤が到達した場合はECが上昇することにより確認できる。なお、ECの測定は、小型自走式ボーリングマシンのロッド先端にECプローブを装着し、地盤中に貫入して測定するダイレクトセンシング技術を活用した<sup>3)</sup>。

排泥量は、地上に排出した排泥をタンクに回収することで測定した。

CVOCsの浄化効果は、6ヶ月後に行ったチェックボーリングでの土壌溶出量の比較と、観測井戸の地下水濃度のモニタリングにより評価した。

EC測定の方法を図3に、実証試験の平面図を図4に示す。

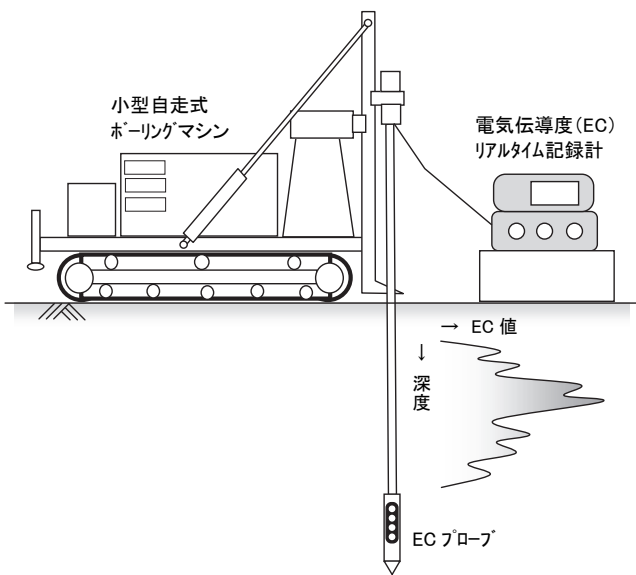


図3 ダイレクトセンシング技術を用いたEC測定

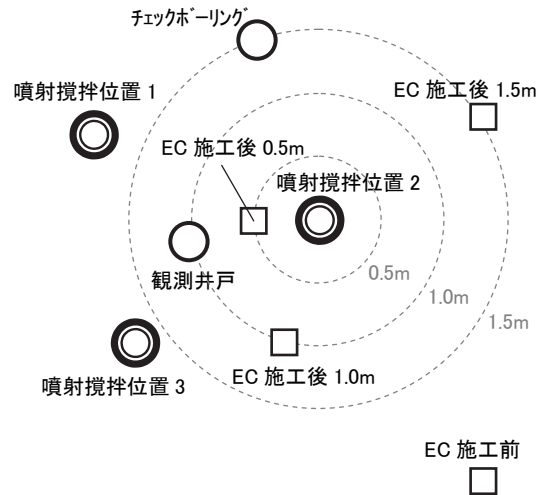


図4 平面図

### 3.3 結果

#### 1) 到達度と排泥量

噴射攪拌位置2から0.5m離れた場所で測定したEC測定結果を、施工前の測定結果に重ねたグラフを図5に示す。

深度GL-6.5m～11mの範囲でシルトを含めて一様にECが上昇していた。例えば、GL-9m付近の砂で施工前20.1 mS/mが施工後59.9 mS/mに、GL-8.5m付近の砂質シルトで施工前36.4 mS/mが施工後60.1 mS/mに、GL-8m付近のシルトで施工前48.1 mS/mが施工後76.7 mS/mにそれぞれ上昇した。一様にECが上昇した深度は噴射攪拌深度とほぼ一致する。よってバイオ促進剤は、施工直後に施工位置を中心に直径1mの範囲は、土質に

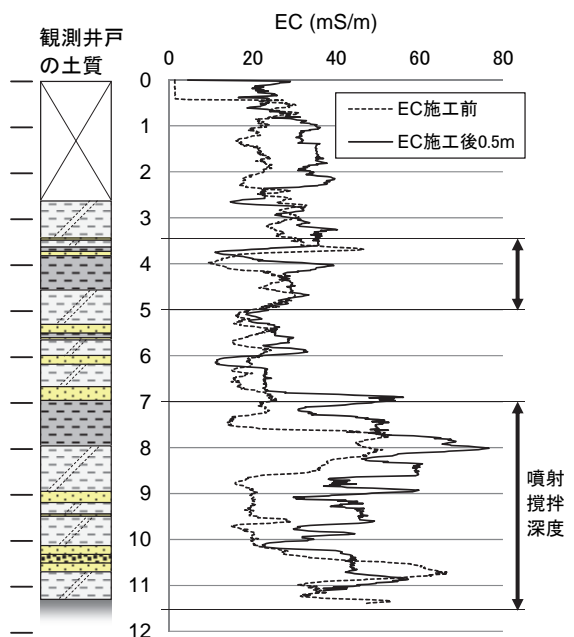


図5 EC測定結果(噴射攪拌位置2より0.5m)

関係なくほぼ確実にバイオ促進剤が到達し、汚染部位と接触したと評価できた。

噴射攪拌位置 2 から 1.0m と 1.5m 離れた場所で測定した EC 測定結果を、施工前の測定結果に重ねたグラフを図 6 に示す。

1.0m と 1.5m 離れた場所では、一様という訳ではないが明らかに EC が上昇している深度があり、比較的透水性がよい土質を浸透して到達していると考えられた。よって透水性のよい土質を浸透して概ね直径 3m の範囲に拡がったと評価できた。粘性土については、前述のと

おり概ね直径 1m の範囲はほぼ確実にバイオ促進剤が到達したと評価できた。

排泥量については、噴射攪拌位置によって量が異なったが、3ヶ所を平均すると噴射量の約 13% が地上に排出した。排泥量が多かった地点では、噴射したバイオ促進剤のロッド周りからのリークがみられた。その理由としては、地点によって土質が多少異なることに加え、下部バツカーのパッキングが不完全だった地点もあったことが主な原因と考えられた。

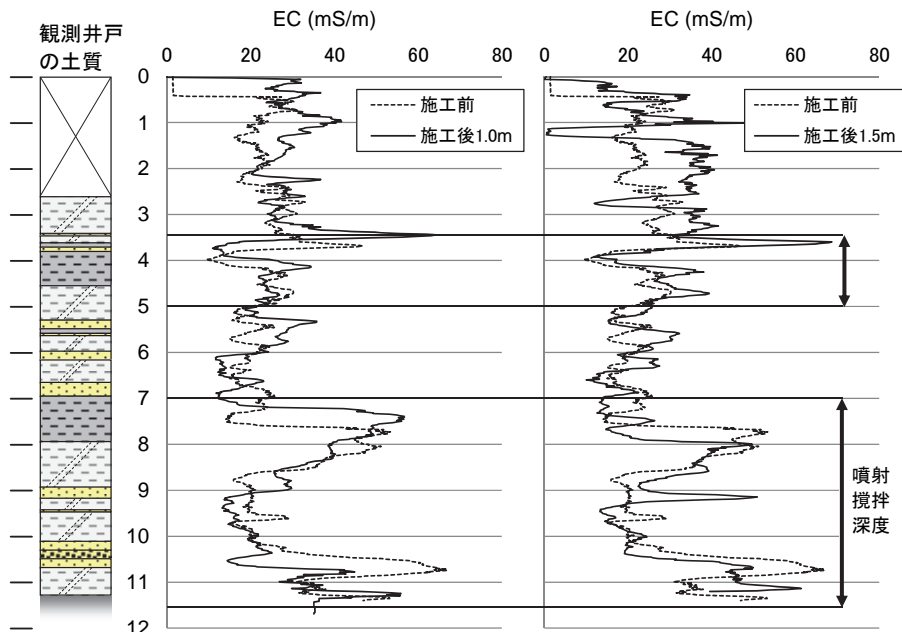


図 6 EC 測定結果(噴射攪拌位置 2 より 1.0m および 1.5m)

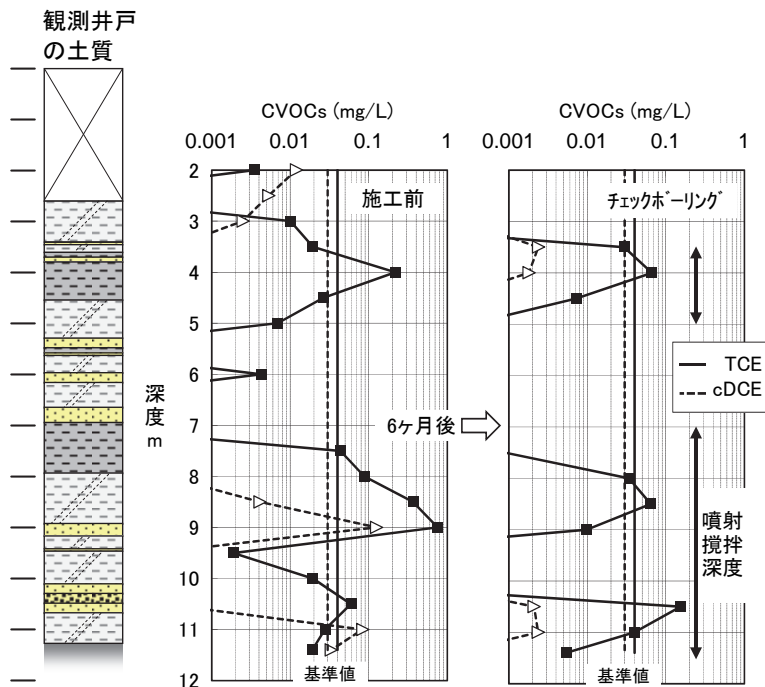


図 7 土壌溶出量の変化

表 2 土壌溶出量測定結果

深度 (GL-m)	施工前		6ヶ月後 →	チェックボーリング	
	TCE	cDCE		TCE	cDCE
2.0	0.012	0.004		<0.001	<0.001
2.5	0.005	<0.001		<0.001	<0.001
3.0	0.003	0.010		<0.001	<0.001
3.5	<0.001	0.019		0.002	0.029
4.0	<0.001	<b>0.22</b>		0.002	<b>0.066</b>
4.5	<0.001	0.027		<0.001	0.007
5.0	<0.001	0.007		<0.001	<0.001
5.5	<0.001	<0.001		<0.001	<0.001
6.0	<0.001	0.004		<0.001	<0.001
6.5	<0.001	<0.001		<0.001	<0.001
7.0	<0.001	<0.001		<0.001	<0.001
7.5	<0.001	<b>0.044</b>		<0.001	0.001
8.0	<0.001	<b>0.088</b>		0.001	0.034
8.5	0.004	<b>0.37</b>		<0.001	<b>0.064</b>
9.0	<b>0.13</b>	<b>0.76</b>		<0.001	0.010
9.5	<0.001	0.002		<0.001	<0.001
10.0	<0.001	0.019		<0.001	<0.001
10.5	<0.001	<b>0.059</b>		0.002	<b>0.15</b>
11.0	<b>0.084</b>	0.028		0.002	0.040
11.4	<b>0.033</b>	0.019		<0.001	0.005

太字 : 土壌溶出量基準不適合

2) 浄化効果

噴射攪拌位置 1 および 2 から 1.5m 離れた場所でチェックボーリングを行い、CVOCs の土壌溶出量を測定した結果を施工前の結果と併せて図 7 及び表 2 に示す。

その結果、TCE の溶出量基準不適合はなかった。cDCE についても施工前と比較して濃度は低かった。例えば、施工前に溶出量基準の約 20 倍であった深度 GL-8.5~9.0m 付近でも、チェックボーリングでは溶出量基準の 2 倍以下であった。

観測井戸における施工から 12 ヶ月間の地下水モニタリング結果を図 8 に示す。TCE は施工後 2 週間以内に地下水基準に適合した。cDCE は施工後に一旦 19 mg/L を記録し

た後、濃度は低下を続け地下水基準の 5 倍程度で推移している。

§4. まとめ

難透水性のシルト、粘土の浄化に対応できる噴射攪拌に注目し、効率的な薬剤接触と排泥の減少を目的とした高圧噴射攪拌工法を開発した。それを原位置バイオレメディエーションに適用し、薬剤の到達度や CVOCs の浄化効果を実証した。結果を以下にまとめる。

- ・新規に設計した噴射ロッドを用いて、シルト、粘土に対して的確に水溶液タイプのバイオ促進剤を接触させることができる吐出圧や噴射量を把握することができた。一方、排泥を抑えるための口元管については、下部パッカーに課題が残った。
- ・バイオ促進剤は、難透水性の土質であっても直径 1m の範囲で確実に汚染部位と接触した。
- ・噴射攪拌位置から 1.5m の位置において、難透水性の土質も含め CVOCs の土壌浄化効果を確認した。また、1.0m の位置において地下水浄化効果を確認した。
- ・バイオ促進剤到達範囲の評価方法として EC ダイレクトセンシング技術は有効であった。
- ・排泥量については、口元管下部パッカーのパッキングが場所によって不完全だったこともあり、噴射量の約 13% が地上に排出した。

§5. おわりに

今後は、排泥のさらなる減少、装置の小型化、バイオレメディエーション以外の原位置浄化・原位置不溶化への適用を図っていきたい。

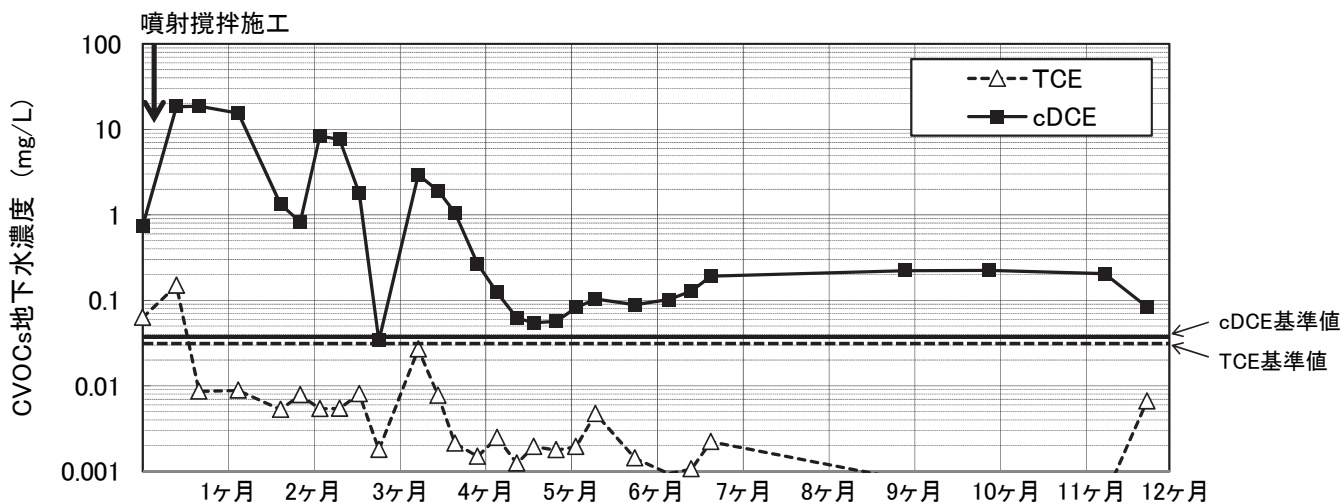


図 8 観測井戸の地下水濃度推移

## 謝辞

本研究において、ダイレクトセンシング技術を用いた薬剤到達度評価について株式会社アイ・エス・ソリューションの協力を得た。

## 参考文献

- 1) 北詰昌義, 塩尻大輔, 野口俊太郎, 近藤敏仁, Richard L.Raymond,Jr, Toru Chino (2011):植物油由来促進剤の VOC 微生物分解評価, 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 第 17 回講演集, pp.64~66.
- 2) 塩尻大輔, 北詰昌義, 飯野浩成 (2013):大規模浄化サイトにおけるバイオスティミュレーションの一事例, 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 第 19 回講演集, pp.253~255.
- 3) 和知剛, 小林裕一, 清水祐也, 北詰昌義, 川元勇治 (2012):電気伝導度測定による地層判定, 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 第 18 回講演集, pp.257~260.



## ひとこと

目に見えない汚染を目に見えない地中で浄化する原位置浄化においては、浄化プロセス及び結果をいかに目に見える形で分かりやすく表すことができるかが、関係者の理解を得る上で重要と考えます。より納得度の高い施工技術、評価技術を追求していきたいと思います。